第 37 卷第 5 期
2017 年 3 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.5
Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510142073
曹阳,高梅香,张雪萍,董承旭.黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征.生态学报,2017,37(5):1677-1687.
Cao Y, Gao M X, Zhang X P, Dong C X. Distribution characteristics of soil macro-faunal communities along a latitudinal gradient in farmland of Heilongjiang Province.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1677-1687.

黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征

曹　阳[1,2],高梅香[1,2,*],张雪萍[1,2],董承旭[1,2]
1 地理科学学院,哈尔滨师范大学, 哈尔滨　150025
2 黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室,哈尔滨师范大学, 哈尔滨　150025

摘要:沿着由高到低的纬度梯度,分别在塔河、带岭、帽儿山的农田生境选择研究样地,采用手捡法调查不同纬度农田生态系统大型土壤动物的群落组成、水平结构、垂直结构和多样性特征,并运用双变量相关分析及典范对应分析阐明土壤动物群落和环境因子的相互关系,旨在揭示黑龙江省不同纬度梯度农田大型土壤动物群落分布特征及其影响因素。调查共捕获大型土壤动物 35 类 2339 只,隶属于 2 门 6 纲 14 目 35 科。其中线蚓科(Enchytraeidae)、正蚓科(Lumbricidae)、步甲科(Carabida)、隐翅虫科(Staphylinidae)为优势类群,其个体数占总个体数的 58.84%;常见类群为蚁科(Formicidae)、蜘蛛目(Araneida)和地蜈蚣目(Geophilomorpha)等 8 类,其个体数占总个体数的 32.79%。结果表明:(1)水平分布上:大型土壤动物个体密度和丰富度(即类群数)的水平分布均表现为帽儿山>带岭>塔河,单因素方差分析表明大型土壤动物的个体密度和丰富度在不同纬度地区无显著差异。Shannon-wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(E)均为帽儿山>带岭>塔河;Simpson 优势度指数(C)表现为塔河和带岭最高,帽儿山最少;Margalef 丰富度指数(D)则是塔河最多,其次为帽儿山和带岭。(2)垂直分布上:3 个不同纬度样地的农田土壤动物个体密度和丰富度在同垂直层次间不存在明显差异($P<0.05$)。除帽儿山 5—10 cm 土层土壤动物类群数量较表层增加之外,其他样地大型土壤动物个体密度和丰富度均随土层深度的增加而逐渐降低,表聚性明显。(3)与土壤环境因子关系上:双变量相关分析表明,不同纬度农田大型土壤动物的类群数、个体密度、多样性指数、均匀度指数和优势度指数与土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷和速效磷均没有显著的相关性;典范对应分析(CCA)进一步表明,优势类群和常见类群对环境因子具有较强的适应能力,广泛的分布在 3 个样地内。研究表明,农田生态系统大型土壤动物的类群数、个体密度和多样性指数随纬度梯度的增加先增加后减少,但不同纬度间均无显著性差异。不同土壤动物类群受到环境变量的影响程度不同,在局地尺度环境因子对土壤动物的影响不容忽视。研究为区域尺度农田生态系统土壤动物空间格局和生物多样性维持机制研究奠定基础。

关键词:大型土壤动物;群落结构;多样性;不同纬度;农田生境

Distribution characteristics of soil macro-faunal communities along a latitudinal gradient in farmland of Heilongjiang Province

CAO Yang[1,2], GAO Meixiang[1,2,*], ZHANG Xueping[1,2], DONG Chengxu[1,2]
1 *College of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin* 150025, *China*
2 *Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin* 150025, *China*

Abstract: Spatial patterns of soil faunal communities at a regional scale are important foundations for the maintenance and protection of belowground biodiversity. Although many studies have addressed the spatial patterns of soil animal communities in different habitats, few have focused on the spatial patterns along latitudinal gradients. In this study, we determined the

基金项目:国家自然科学基金项目(41471037,41371072,41430857);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2015054)
收稿日期:2015-10-15;　　**网络出版日期**:2016-07-13

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: gmx102@ hotmail.com

composition, horizontal structure, vertical structure, and diversity characteristics of soil macrofaunal communities in farmland systems along a latitudinal gradient. We selected three representative mountain areas along the latitudinal gradient: the Maoer Mountains (Maoer Mountain ecosystem station, 45°20′—45°25′N, 127°30′—127°34′E), the Xiaoxing′an Mountains (Dailing, 47°10′—47°14′N, 128°53′—128°55′E), and the Da Hinggan Mountains (Tahe, 52°09′—53°23′N, 123°19′—125°48′E). In each study area, three farmlands at least 50 m apart with similar conditions were randomly selected. In each farmland, four plots (5 m × 5 m) were randomly delineated. In each plot, four soil profiles (50 cm × 50 cm) were randomly collected and divided equally into three 5 cm strata to survey the soil macrofaunal communities. The hand picking method of separation was used to determine the soil macrofaunal communities. Fieldwork was conducted in August 2011. Using bivariate related analysis and canonical correspondence analysis, we assessed the relationships between soil animal communities and environmental factors. In total, 2339 individuals from 35 groups of soil animals were collected, which belonged to 2 phyla, 6 classes, 14 orders, and 35 families. Enchytraeidae, Lumbricidae, Carabidae, and Staphylinidae were dominant families, accounting for 58.84% of the total number of individuals. Formicidae, Araneidae, and Geophilomorpha were common groups, accounting for 32.79% of the total number of individuals. The results showed that: (1) In terms of horizontal distribution, individual density and richness (i.e. numbers of groups) at sites followed the order Maoer Mountain > Dailing > Tahe. Results of the one-way ANOVA revealed there were no significant differences in individual density or richness in the soil macrofaunal communities at different latitudes. The Shannon-Wiener diversity index (H) and Pielou evenness index (E) for sites followed the order Maoer Mountain > Dailing > Tahe. The Simpson dominance index (C) of Tahe and Dailing were higher than that of the Maoer Mountains, and the Margalef richness index (D) was greatest in Tahe, followed by the Maoer Mountains and Dailing. (2) In terms of vertical distribution, no significant differences were detected among the three different latitudinal areas for individual density or richness at the same vertical level ($P < 0.05$). Individual density and richness in soil macrofaunal communities decreased with increasing soil depth, except for soil macrofaunal communities from the Maoer Mountains at 5—10 cm, indicating an obvious surface aggregation. (3) Regarding the relationships between soil macrofaunal communities and soil environmental factors, the bivariate correlation analysis showed there were no significant correlations among richness, individual densities, diversity indices, evenness indices, richness indices, pH values, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus. Results of canonical correspondence analysis further indicated that the dominant and common groups were highly adaptable to environmental factors and the dominant and common groups were widely distributed in the three latitudinal areas. This study showed that the numbers of groups, individual densities, and diversity indices of the soil macrofaunal communities from the farmland ecosystem changed along a latitudinal gradient, but no significant changes were found in this study. Different soil animal groups at different latitudes are affected by environment variables. At the local scale, the influence of environmental factors on soil macrofauna should not be ignored. The results of the study create a foundation for researching spatial patterns and mechanisms of biodiversity maintenance at regional scales.

Key Words: soil macro-fauna; community structure; diversity; different latitudes; farmland habitat

土壤动物数量丰富,分布广泛,处于整个土壤食物链的顶端,是农田生态系统重要的分解者,在分解残体、改变土壤理化性质、土壤形成与发育、促进土壤物质循环与能量转化等方面起着关键的作用,并且能够对环境的变化做出迅速的反应[1-5]。研究不同纬度梯度农田大型土壤动物群落空间分布特征,分析农田大型土壤动物对气候变化的响应规律,是全球变化背景下进行生物多样性保护的重要基础,有助于人们在区域尺度揭示地下生态系统的生物多样性格局特征,同时也是进行农田生态系统结构功能管理的重要依据。

大量研究表明,土壤动物的研究主要集中在重金属等导致的农田污染对土壤动物的影响,以及气候变化和人为干扰下生态系统退化对土壤动物的影响。21 世纪以后,对土壤动物研究范围有了进一步扩展,涉及到

各种自然灾害、旅游活动和全球变化等对土壤动物群落的影响等。不同土地利用方式下土壤动物的群落组成和数量变化、生态特征和动态变化、多样性及其评价指标分析、大型土壤动物与环境因子的相互关系等也已在国内广泛展开,部分研究结果表明,土壤动物随纬度的增高数量变少[6-11]。近年来,有关土壤动物对环境的指示作用和修复作用也时常有报道[12-14],国内外对生物多样性的纬度梯度分布规律及物种丰富度有所研究,部分学者对不同纬度引起的气候变量与物种的丰富度之间的关系等进行了研究[15-18],但对不同纬度大型土壤动物的群落分布研究甚少。张雪萍等[19-25]对塔河、带岭、帽儿山的土壤动物做过大量细致的研究,但都是对某一地区样地的土壤动物进行研究,对不同纬度梯度之间大型土壤动物的群落组成变化研究较少[5,26-29]。

本研究目的在于探究由不同纬度而引起的气候变化下,大型土壤动物的区系组成、分布特征和规律及其影响机制,对于黑龙江省不同纬度大型土壤动物区系组成和生态地理分布变化规律,及其在生态系统中的功能作用具有重要的意义,以期反映黑龙江省不同纬度的大型土壤动物的群落特征,为区域尺度农田生态系统土壤动物空间格局研究奠定基础,也为区域尺度生物多样性维持机制研究提供数据支持。

1　研究区自然概况

试验地点设在黑龙江省,按照纬度从高到低选取具有代表性的研究区,分别为黑龙江省东部山地(帽儿山)—小兴安岭(带岭)—大兴安岭(塔河)。塔河县地处黑龙江省北部、大兴安岭伊勒呼里山北坡,地理坐标为 52°09′—53°23′N,123°19′—125°48′E,平均海拔约为 600m,属寒温带大陆性季风气候,冬季漫长而寒冷,夏季短暂而湿热,年平均气温-2.4℃,年降水量为 428mm,年无霜期在 80—100d,地带性土壤为棕色针叶林土。带岭研究区位于黑龙江省伊春市带岭区境内,地理位置为:47°10′—47°14′N,128°53′—128°55′ E,本区地处小兴安岭山脉的南段达里带岭支脉的东坡,平均海拔约为 400m。本区具有明显的温带大陆性季风气候特征。年平均气温 1.4℃,年平均最高气温 7.5℃,年平均最低气温-6.6℃,年平均降水量为 676mm。地带性土壤为暗棕色森林土为主,草甸土、沼泽土和泥炭土少量。帽儿山研究地点设在东北林业大学帽儿山实验林场,帽儿山位于东北东部山地张广才岭余脉,位于黑龙江省尚志市境内,地理位置为 45°20′—45°25′N,127°30′—127°34′ E,主要为低山丘陵,地势北高南低,平均海拔为 300m,本区气候属于大陆性季风气候。年平均气温 2.7℃,最冷月平均气温为-19.7℃,最热月平均气温为 20.9℃,极端最高温度是 31.8℃,极端最低温度是-31.9℃,暗棕壤是本地区地带性土壤[16-18]。

2　研究方法

2.1　野外研究方法

2011 年 8 月分别在塔河、带岭和帽儿山随机选择 3 块施用无机化肥的玉米农田样地,3 块样地彼此之间至少间隔 50m 以上的距离。在每个纬度区域,首先在每个农田样地中分别随机设置 4 个 5m×5m 的样方,然后在每个样方中随机选取 4 个面积为 50cm×50cm 的采样点作为重复。使用铁锹沿土壤剖面获得每个采样点 0—5、5—10、10—15cm 的大型土壤动物群落,每个纬度农田生态系统分别获得 48 个样品,即 3 层×4 采样点×4 样方。采用手捡法对大型土壤动物样品进行就地分拣,然后放入 75%酒精中固定,带回实验室内进行分类鉴定。

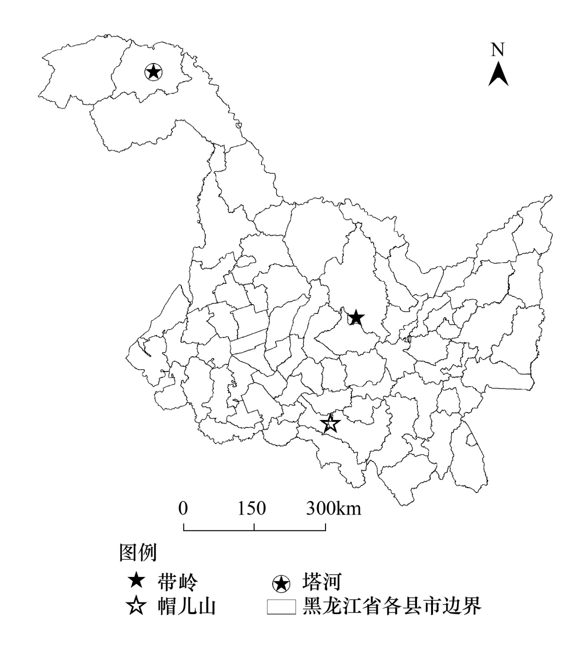


图 1　不同纬度梯度样地分布

Fig.1　Distribution of sites in different latitude gradient

在调查大型土壤动物样品的同时,获得土壤理化性质分析样品。在每个纬度区域,分别在选择的 3 个农田

样地中随机选择 2 个样方,在该大型土壤动物的采样点附近,使用小铁锹沿着 3 个层次(0—5、5—10、10—15cm)分别挖取 10cm×10cm 的土方,将土方放入自封袋带回室内待测土壤理化性质,同时使用铝盒获得测量土壤含水量的样品。在每个纬度农田生态系统,分别获得土壤理化性状样品 18 个,即 3 层×2 采样点×3 样地。

2.2 室内研究方法

依据尹文英的《中国土壤动物检索图鉴》,在显微镜下对大型土壤动物进行分类鉴定,物种鉴定到科,部分物种鉴定到目,将成虫和幼虫分开计数,在本文分析过程中只统计成虫。测量土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、速效磷和速效钾 6 个主要的理化指标[30]。采用电位法测定土壤 pH 值,采取丘林法测定土壤有机质,采取重铬酸钾-硫酸消化法测定土壤全氮含量,采用 SMT 方法测定全磷含量,采用 0.5mol/L $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量,采取双酸浸提、钼锑抗比色法测定速效钾。土壤环境特征见表 1。

表 1 黑龙江省不同纬度农田生境的土壤特性

Table 1 Soil characteristics of farmland habitats from different latitudes in Heilongjiang Province (Mean±SE)

土壤特性 Soil characteristics	塔河 Tahe			带岭 Dailing			帽儿山 Maoer Mountain		
	0—5cm	5—10cm	10—15cm	0—5cm	5—10cm	10—15cm	0—5cm	5—10cm	10—15cm
速效钾 AK/(g/kg)	0.059±0.005	0.054±0.005	0.053±0.005	0.062±0.003	0.058±0.003	0.056±0.005	0.042±0.292	0.045±0.003	0.043±0.003
全磷 TP/(g/kg)	27.801±2.957	29.200±2.841	28.532±3.675	28.004±2.600	27.576±3.353	27.550±3.475	17.737±2.259	16.839±2.298	15.746±2.181
速效磷 AP/(g/kg)	1.700±0.519	1.656±0.422	1.333±0.362	1.639±0.431	1.925±0.398	1.376±0.370	0.678±0.519	0.632±0.256	0.559±0.243
全氮 TN/(g/kg)	0.005±0.001	0.004±0.001	0.004±0.002	0.003±0.000	0.003±0.000	0.003±0.000	0.003±0.000	0.002±0.000	0.003±0.000
有机质 SOM/(g/kg)	0.090±0.013	0.087±0.012	0.082±0.014	0.069±0.003	0.069±0.003	0.066±0.003	0.055±0.005	0.047±0.003	0.045±0.003
pH	5.969±0.346	5.941±0.341	6.031±0.392	6.204±0.255	6.200±0.252	6.290±0.230	6.391±0.233	6.430±0.246	6.571±0.221

2.3 数据分析与处理

多样性指数:选用 Shannon-wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(E)、Simpson 优势度指数(C)和 Margalef 丰富度指数(D)对土壤动物群落结构多样性进行分析。计算公式如下[21]:

Shannon-wiener 多样性指数

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \ln p_i \tag{1}$$

Pielou 均匀度指数

$$E = H'/\ln S \tag{2}$$

Simpson 优势度指数

$$C = \sum_{i=1}^{s} (p_i)^2 \tag{3}$$

Margalef 丰富度指数

$$D = \ln S/\ln N \tag{4}$$

式中,p_i 指 i 类群在群落中的个体比例,即 $p_i = n_i/N$,n_i 为样区内第 i 个类群的个体数量,N 为样区内所有类群的个体数量,S 为样区内类群的数目。

所有数据的分析与制图采用 SPSS 19.0、Origin 7.0 和 CANOCO 5.0 软件。利用 SPSS 19.0 软件中的单因素方差分析(One way ANOVA, LSD)比较不同纬度大型土壤动物个体数、类群数差异的显著性,双变量相关分析(Bivariate correlation analysis)方法对环境因子与土壤动物群落指标的相关性进行分析;用 CANOCO 5.0 软件中的典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CCA)对本研究中大型土壤动物数量及优势类群和常见类群的数量与土壤环境因子进行相关分析。

3　结果与分析

3.1　大型土壤动物群落组成

本研究共获得大型土壤动物 35 类 2339 只,隶属于 2 门 6 纲 14 目 35 科,平均密度为 778.33 只/m^2,其中优势类群(>总个体数 10%)4 类,为线蚓科(Enchytraeidae)、正蚓科(Lumbricidae)、步甲科(Carabida)、隐翅虫科(Staphylinidae),占总个体数的 58.84%;常见类群(占总个体数 1%—10%)8 类,为蚁科(Formicidae)、蜘蛛目(Araneida)、地蜈蚣目(Geophilomorpha)、石蜈蚣目(Lithobiomorpha)、马陆目(Juliformia)、叩甲科(Elateridae)、金龟甲科(Scarabaeoidae)、蝙蝠蛾科(Hepialidae),占总个体数的 32.79%;稀有类群(<总个体数 1%)23 类,为象甲科(Curculionidae)、舞虻科(Empidadae)、鹬虻科(Rhagionidae)、大蚊科(Tipulidae)、叶甲科(Ghrysomelidae)、剑虻科(Therevidae)等,占总个体数的 8.37%(表 2)。

表 2　黑龙江省不同纬度农田生境大型土壤动物的群落组成

Table 2　Community compositions of soil macro-fauna in farmland habitats from different latitudes of Heilongjiang Province (Mean±SE)

序号 Order	类群 Group	塔河 Tahe		带岭 Dailing		帽儿山 Maoer Mountain		总 Total		优势度 Abundence
		密度 Density /(只/m^2)	%	密度 Density /(只/m^2)	%	密度 Density /(只/m^2)	%	密度 Density /(只/m^2)	%	
1	线蚓科 Enchytraeidae	129.00±104.06	21.46	281.00±230.13	21.46	158.0±79.84	23.87	568.00±301.98	24.28	+ + +
2	正蚓科 Lumbricidae	43.00±27.00	7.15	210.00±112.98	19.52	30.0±24.68	4.53	283.00±143.37	12.10	+ + +
3	蜘蛛目 Araneida	65.00±14.55	10.82	51.00±13.99	4.74	44.0±9.93	6.65	160.00±21.73	6.84	+ +
4	地蜈蚣目 Geophilomorpha	7.00±4.12	1.16	130.00±63.93	12.08	69.0±20.55	10.42	206.00±86.79	8.81	+ +
5	石蜈蚣目 Lithobiomorpha	16.00±10.95	2.66	10.00±3.46	0.93	28.0±21.42	4.23	54.00±24.08	2.31	+ +
6	马陆目 Juliformia			28.00±26.68	2.60	9.00±9.00	1.35	37.00±35.68	1.58	+ +
7	鼠妇科 Porcellio spinicornis	23.00±23.00	3.83					23.00±23.00	0.98	+
8	步甲科 Carabidae	83.00±32.80	13.81	110.00±32.60	10.22	54.00±34.12	8.16	247.00±58.13	10.56	+ +
9	隐翅虫科 Staphylinidae	152.00±56.31	25.29	93.00±39.41	8.64	35.00±12.48	5.29	280.00±48.58	11.97	+ +
10	象甲科 Curculionidae	1.00±1.00	0.17					1.00±1.00	0.04	+
11	叩甲科 Elateridae	3.00±1.91	0.50	24.00±5.65	2.23	3.00±3.00	0.45	30.00±6.22	1.28	+ +
12	锹甲科 Lucanidae			2.00±1.15	0.19	2.00±1.15	0.30	4.00±0.00	0.17	+
13	金龟甲科 Scarabaeoidae	3.00±3.00	0.50	28.00±16.25	2.60	29.00±8.70	4.38	60.00±21.23	2.57	+ +
14	叶甲科 Ghrysomelidae			1.00±1.00	0.09			1.00±1.00	0.04	+
15	虎甲科 Cicindelidae	1.00±1.00	0.17	4.00±2.83	0.37	13.00±5.51	1.96	18.00±4.76	0.77	+
16	拟步甲科 Tenebrionidae			1.00±1.00	0.09			1.00±1.00	0.04	+
17	葬甲科 Silphidae					9.00±9.00	1.36	9.00±9.00	0.38	+
18	冬大蚊科 Trichoceridae	1.00±1.00	0.17					1.00±1.00	0.04	+
19	毛蚊科 Bibionidae	2.00±2.00	0.33	1.00±1.00	0.09	1.00±1.00	0.15	4.00±1.63	0.17	+
20	蚤蝇科 Phoridae	2.00±1.15	0.33					2.00±1.15	0.09	+
21	大蚊科 Tipulidae	3.00±1.91	0.50	10.00±8.72	0.93	3.00±1.91	0.45	16.00±9.93	0.68	+
22	舞虻科 Empidadae	9.00±5.26	1.50	4.00±2.83	0.37	9.00±7.72	1.36	22.00±9.59	0.94	+
23	鹬虻科 Rhagionidae	3.00±3.00	0.50	2.00±1.15	0.19			5.00±3.79	0.21	+
24	长足虻科 Dolichopodadae	2.00±2.00	0.33	2.00±2.00	0.19	1.00±1.00	0.15	5.00±5.00	0.21	+
25	剑虻科 Therevidae	4.00±2.83	0.67					4.00±2.83	0.17	+
26	食木虻科 Xylophagiae					14.00±14.00	2.11	14.00±14.00	0.60	+
27	蚁科 Formicidae	32.00±10.71	5.32	45.00±32.10	4.18	111.00±32.10	16.78	188.00±13.95	8.04	+ +
28	土蝽科 Cydnidae	8.00±1.63	1.33	3.00±1.91	0.28	3.00±1.00	0.45	14.00±1.15	0.60	+
29	椿象若虫 Hemiptera	3.00±1.00	0.50	7.00±2.52	0.65	11.00±9.71	1.66	21.00±12.15	0.90	+
30	蝙蝠蛾科 Hepialidae	5.00±3.79	0.83	6.00±4.76	0.56	21.00±13.40	3.17	32.00±17.81	1.37	+ +
31	尺蛾科 Geometridae					1.00±1.00	0.15	1.00±1.00	0.04	+

续表

序号 Order	类群 Group	塔河 Tahe 密度 Density /(只/m²)	塔河 Tahe %	带岭 Dailing 密度 Density /(只/m²)	带岭 Dailing %	帽儿山 Maoer Mountain 密度 Density /(只/m²)	帽儿山 Maoer Mountain %	总 Total 密度 Density /(只/m²)	总 Total %	优势度 Abundence
32	天蛾科 Sphingidae			2.00±2.00	0.19			2.00±2.00	0.09	+
33	球螋科 Forficulidae			1.00±1.00	0.09	3.00±1.91	0.45	4.00±2.31	0.17	+
34	蝼蛄科 Gryllotalpidae			20.00±14.79	1.86	1.00±1.00	0.15	21.00±15.78	0.90	+
35	蜢总科 Eumastacoidea	1.00±2.00	0.17					1.00±1.00	0.04	+
	总密度 Total density	601.00±317.98	100	1076.00±628.85	100	662.00±325.03	100	2339.00±893.62	100	
	总类群数 Total group number	25		26		25		35		

+ + +:优势类群(>10%);+ +:常见类群(1%—10%);+:稀有类群(<1%)

塔河实验样地共获得大型土壤动物 25 类、601 只,隶属于 2 门 5 纲 13 目。其中优势类群 4 类,为隐翅虫科(Staphylinidae)、线蚓科(Enchytraeidae)、步甲科(Carabidae)和蜘蛛目(Araneida),占总个体数的 71.38%,常见类群有正蚓科(Lumbricidae)、地蜈蚣目(Geophilomorpha)、石蜈蚣目(Lithobiomorpha)等 7 类,占总个体数的 22.96%,稀有类群有蜢总科(Eumastacoidea)、象甲科(Curculionidae)、虎甲科(Cicindelidae)等 14 类,占个体数的 5.66%;带岭实验样地共获得大型土壤动物 26 类、1076 只,隶属于 2 门 5 纲 13 目。其中优势类群 4 类,为线蚓科(Enchytraeidae)、正蚓科(Lumbricidae)、地蜈蚣科(Geophilomorpha)和步甲科(Carabidae),占总个体数的 67.94%,常见类群有蜘蛛目(Araneida)、马陆目(Juliformia)、隐翅虫科(Staphylinidae)等 7 类,占总个体数的 26.86%,稀有类群有石蜈蚣目(Lithobiomorpha)、锹甲科(Lucanidae)、叶甲科(Ghrysomelidae)等 15 类,占总个体数的 5.2%;帽儿山实验样地共获得大型土壤动物 25 类、662 只,隶属于 2 门 5 纲 13 目。其中优势类群 3 类,为线蚓科(Enchytraeidae)、蚁科(Formicidae)和地蜈蚣科(Geophilomorpha),占总个体数的 52.06%,常见类群有正蚓科(Lumbricidae)、蜘蛛目(Araneida)、金龟甲科(Scarabaeoidae)等 13 类,占总个体数的 46.25%;稀有类群有锹甲科(Lucanidae)、叩甲科(Elateridae)、毛蚊科(Bibionidae)等,占总个体数的 1.69%(表 2)。

同一物种在不同纬度农田生境中的分布特征存在差异,如线蚓科(Enchytraeidae)在不同纬度中均为优势类群,毛蚊科(Bibionidae)、长足虻科(Dolichopodadae)在不同纬度中均为稀有类群,正蚓科(Lumbricidae)在塔河和帽儿山样地中为常见类群,在带岭样地中为优势类群,蜘蛛目(Araneida)在带岭和帽儿山样地为常见类群,在塔河样地为优势类群,石蜈蚣目(Lithobiomorpha)在塔河和帽儿山样地中为常见类群,在带岭样地中为稀有类群;马陆目(Juliformia)在带岭和帽儿山样地中为常见类群,而在塔河样地没有分布等(表 2)。

3.2 不同纬度的土壤动物的水平分布特征

带岭样地的大型土壤动物的个体密度和丰富度(即类群数)均最多,与塔河和帽儿山样地无显著差异(表 3)。但少部分土壤动物在不同样地中的个体密度存在不同的差异,如地蜈蚣目(Geophilomorpha)在塔河样地中有 7.00 只/m²,在带岭样地中高达 130.00 只/m²,存在显著差异,而毛蚊科(Bibionidae)(1—2 只/m²)、长足虻科(Dolichopodadae)(1—2 只/m²)等在不同样地中的个体密度差异不显著。

同一种类群在不同样地中优势度是不同的,如隐翅虫科(Staphylinidae)在塔河样地为优势类群,在带岭和帽儿山样地为常见类群。不同纬度的 3 个样地共有类群 18 类,线蚓科(Enchytraeidae)为 3 个样地共有优势类群,蜢总科(Eumastacoidea)为塔河样地的特有类群,天蛾科(Sphingidae)只出现在带岭样地,帽儿山样地才有尺蛾科(Geometridae)、葬甲科(Silphidae)(表 2)。

通过单因素方差分析方法可知,3 个不同样地的多样性指数均无显著差异,个体密度和丰富度的大小顺序均为:带岭>帽儿山>塔河,H'指数和 E 指数均表现为:帽儿山>带岭>塔河,C 指数表现为塔河和带岭最高,帽儿山最少,D 指数则是塔河最多,其次为帽儿山和带岭(表 3)。

3.3 不同纬度的大型土壤动物的垂直分布特征

大型土壤动物个体密度和丰富度在不同纬度的垂直方向上均无显著差异。通过分析,多样性指数也均无

显著性差异(表 3)。个体密度在土层分布上呈现显著的表聚性,但不同纬度的同土层变化情况不同(图 2)。在 0—5cm 层,大型土壤动物的个体密度呈现带岭样地最高,帽儿山样地最低,塔河样地居中,丰富度大小顺序依次为带岭>帽儿山>塔河;5—10cm 层,大型土壤动物的个体密度带岭样地最多、塔河和帽儿山样地次之,丰富度为帽儿山>带岭>塔河;10—15cm 层大型土壤动物的个体密度和丰富度均为带岭样地最多,塔河样地最低,帽儿山样地居中。各土层的大型土壤动物均未随纬度的变化而呈现有规律性的变化。

表 3　大型土壤动物的多样性分析

Table 3　Diversity analysis of soil macro-fauna (Mean±SE)

项目 Item	N/(只/m^2)	S	H'	E	C	D
样地 Sites						
塔河 Tahe	601.00±317.98	14.00±2.94	1.90±0.11	0.13±0.02	0.21±0.02	0.55±0.02
带岭 Dailing	1076.00±628.85	16.75±1.03	1.99±0.16	0.71±0.05	0.21±0.05	0.53±0.04
帽儿山 Maoer Mountain	662.00±325.03	15.50±1.44	2.11±0.13	0.77±0.03	0.18±0.03	0.54±0.02
土层 Siol layer						
0—5cm	395.32±77.44	11.67±0.99	1.86±0.08	0.78±0.02	0.21±0.02	0.57±0.02
5—10cm	282.00±45.68	11.00±0.92	1.90±0.77	0.81±0.02	0.21±0.02	0.63±0.02
10—15cm	156.32±37.80	8.17±0.90	1.60±0.09	0.80±0.03	0.27±0.03	0.61±0.02

同一列不同字母表示显著性差异组别(P<0.05) N: 个体密度;S: 类群数;H': 多样性指数; E: 均匀度指数;C: 优势度指数;D: 丰富度指数

不同纬度样地大型土壤动物在同土层的类群组成及分布存在差异,有些类群在各个土层均为优势物种、常见物种或稀有物种,有些土壤动物类群只分布在特定土层,有些土壤动物不呈表聚性等。如线蚓科(Enchytraeidae)为 3 个纬度样地各层的优势种,毛蚊科(Bibionidae)、叶甲科(Ghrysomelidae)、锹甲科(Lucanidae)、拟步甲科(Tenebrionidae)、剑虻科(Therevidae)和蚤蝇科(Phoridae)在 3 个纬度样地中各土层均为稀有物种。0—5cm 层,石蜈蚣目(Lithobiomorpha)在塔河和带岭样地为常见物种,在帽儿山样地为优势物种,正蚓科(Lumbricidae)在塔河和帽儿山样地为常见物种,在带岭样地为优势物种,金龟甲科(Scarabaeoidae)在塔河样地为稀有物种,在带岭和帽儿山样地为常见物种。5—10cm 层,蜘蛛目(Araneida)在 3 个纬度样地均为常见物种,石蜈蚣目(Lithobiomorpha)在塔河和带岭样地为常见物种,在帽儿山样地为优势物种,正蚓科(Lumbricidae)在塔河和帽儿山样地为常见物种,在带岭样地为优势物种。10—15cm 层,步甲科(Carabidae)和蜘蛛目(Araneida)在 3 个纬度样地均为常见物种,隐翅虫科(Staphylinidae)在塔河样地中为优势种,在带岭和帽儿山样地为常见物种等等。一些类群只出现在特定土层,塔河样地的象甲科(Curculionidae)、鹬虻科(Rhagionidae)等,帽儿山样地的蝼蛄科(Gryllotalpidae)等只在 0—5cm 土层有分布;塔河样地的叩甲科(Elateridae)和蜢总科(Eumastacoidea)等,带岭样地的鹬虻科(Rhagionidae)和毛蚊科(Bibionidae),帽儿山样地的长足虻科(Dolichopodadae)和尺蛾科(Geometridae)只出现在 5—10cm 土层。不同类群土壤动物个体密度在垂直方向上变化规律是不同的,如步甲科(Carabidae)等物种是随土层深度的增加而减少的,带岭样地中的葬甲科(Silphidae)在各土层分布较均匀,带岭和帽儿山样地的叩甲科(Elateridae)等的个体密度呈递增趋势。塔河样地的舞虻科(Empidadae)、金龟甲科(Scarabaeoidae)在 0—5cm 土层是稀有物种,在 10—15cm 土层却是常见物种,带岭样地的叶甲科(Ghrysomelidae)和球螋科(Forficulidae)出现在 10—15cm 土层,帽儿山样地的马陆目(Juliformia)在 5—10cm 土层和 10—15cm 土层为常见物种,在 0—5cm 土层却是稀有类群,这些类群不呈现表聚性(表 2)。

3.4　大型土壤动物群落指标与土壤环境因子的相关分析

通过双变量相关分析得出结果显示:塔河样地的丰富度和 D 指数与土壤环境因子呈正相关;个体密度除与速效磷和全氮呈负相关、H'指数和 C 指数除与 pH 值呈负相关外与其他土壤环境因子均呈正相关;E 指数与 pH 值呈正相关,与其他土壤环境因子均呈负相关。带岭样地的丰富度与速效钾、速效磷、有机质呈负相关,与全氮、全磷和 pH 值呈正相关;个体密度与 pH 值呈正相关,与其他土壤环境因子均呈负相关;H'指数、

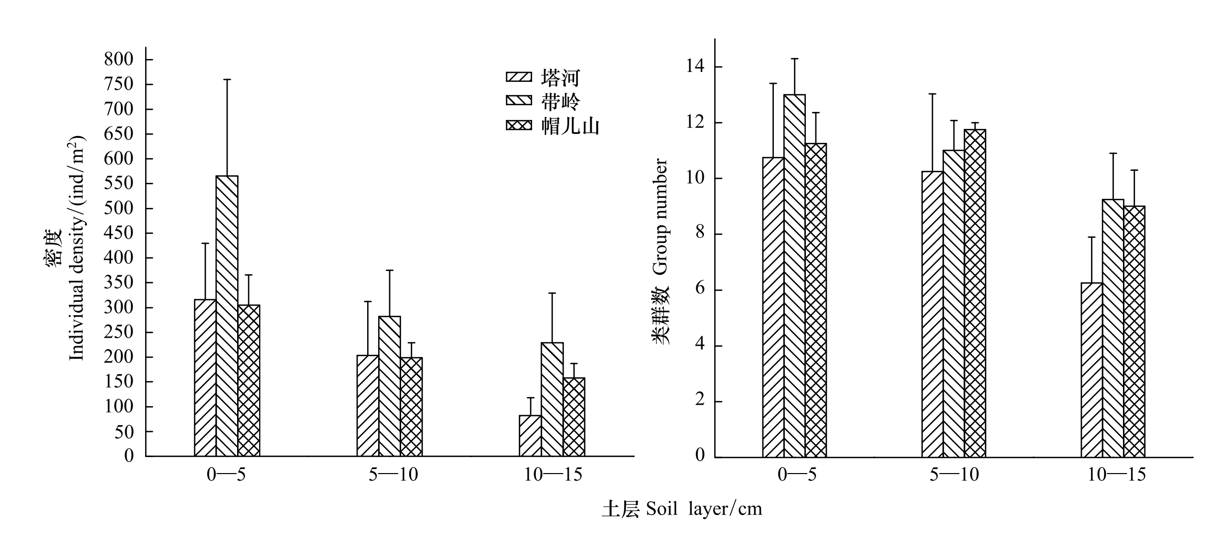


图 2 不同纬度农田生境大型土壤动物个体密度和类群数的垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of individual density and species number of soil macro-fauna in farmland habitats from different latitudes

E 指数与全氮和有机质呈正相关,*C* 指数与全氮和有机质呈负相关;*D* 指数与土壤环境因子均呈正相关。帽儿山样地的丰富度与速效钾呈正相关、个体密度与速效钾呈负相关,而丰富度和个体密度与全氮相关结果与上相反;*H′*指数和 *D* 指数除与全氮呈负相关外,与其他土壤环境因子均呈正相关;*E* 指数与全磷和全氮呈负相关,与其他土壤环境因子呈正相关;*C* 指数除与全氮呈正相关外,与其他土壤环境因子均呈负相关。但是,3 个样地大型土壤动物群落指标与土壤环境因子均无显著的相关性。

利用 CCA 分析不同纬度大型土壤动物类群的数量与土壤环境因子之间的关系(图 3)。图中塔河样地的 Axis1 与 Axis2 的 Eigenvalues 值分别为 0.2274 和 0.1137,带岭样地的 Axis1 与 Axis2 的 Eigenvalues 值分别为 0.2048和 0.1087,帽儿山样地的 Axis1 与 Axis2 的 Eigenvalues 值分别为 0.2788 和 0.1317。塔河样地中的蜘蛛目(Araneida)、隐翅虫科(Staphylinidae)等,带岭样地中的线蚓科(Enchytraeidae)、地蜈蚣目(Geophilomorpha)和石蜈蚣目(Lithobiomorpha)等,帽儿山样地中线蚓科(Enchytraeidae)、地蜈蚣目(Geophilomorpha)和蚁科(Formicidae)等分布广泛,也是各样地中的优势类群和常见类群,集中在图的中心位置;塔河样地的舞虻科(Empidadae)和带岭样地的毛蚊科(Bibionidae)与全氮相关性较大,带岭样地的蜘蛛目(Araneida)和叩甲科(Elateridae)、帽儿山样地的尺蛾科(Geometridae)与土壤有机质相关性较大。

4 讨论

4.1 不同纬度大型土壤动物群落组成特征

通过对黑龙江省 3 个不同纬度的大型土壤动物的调查表明,线蚓科(Enchytraeidae)为 3 个样地的共同优势类群,表现出对不同纬度的普适性。张雪萍等[20]在大兴安岭北部森林生态系统大型土壤动物群落特征中,线蚓科(Enchytraeidae)为优势类群,与本研究塔河样地结果一致。其研究表明蜘蛛目(Araneida)、隐翅虫科(Staphylinidae)和步甲科(Carabidae)是常见类群,但在本研究中为优势类群,结论不完全一致,说明在同一地点不同生态系统中物种分布有差异。在调查中,天蛾科(Sphingidae)只在带岭样地中出现,而张雪萍、林英华等[20-22]对塔河、带岭和帽儿山土壤动物的研究中均未调查出天蛾科(Sphingidae),这可能是受不同环境因素或者样地位置选择的影响的缘故。本研究中,帽儿山样地中的稀有丰富度最小,与以往学者[21-22,31]对帽儿山土壤动物群落结构研究相一致,且类群种类差异也较小。由于不同地区环境的异质性有所差异,因此 3 个纬度的群落以及不同土层深度均有各自的特有类群。通过单因素方差分析法可知 3 个样地的丰富度均无显著差异,说明丰富度受纬度影响不大。大型土壤动物对环境变化具有一定的指示作用,由此可见,对于土壤动物的研究应该更加注重类群的不同纬度的分析,基于物种不同纬度的水平土壤动物类群与环境关系的研究,能

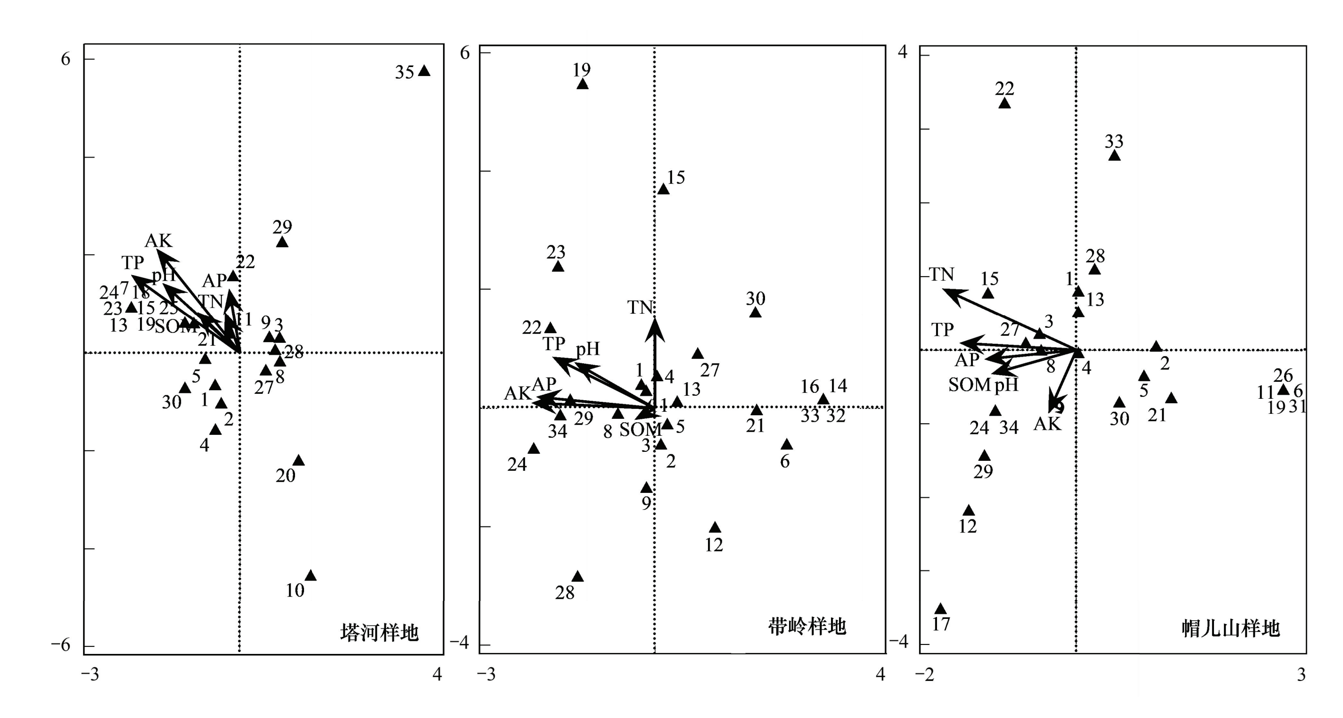


图 3　不同纬度农田生境大型土壤动物对应分析二维排序图

Fig.3　Correspondence analysis ordination bassed on soil macro-fauna in famland habitats from different latitudes

AK:速效钾;TP:全磷;AP:速效磷;TN:全氮;SOM 有机质;1:线蚓科 Enchytraeidae; 2:正蚓科 Lumbricidae; 3:蜘蛛目 Araneida; 4:地蜈蚣目 Geophilomorpha; 5:石蜈蚣目 Lithobiomorpha; 6:马陆目 Juliformia; 7:鼠妇科 Porcellio spinicorni; 8:步甲科 Carabidae; 9:隐翅虫科 Staphylinidae; 10:象甲科 Curculionidae; 11:叩甲科 Elateridae; 12:锹甲科 Lucanidae; 13:金龟甲科 Scarabaeoidae; 14:叶甲科 Ghrysomelidae; 15:虎甲科 Cicindelidae; 16:拟步甲科 Tenebrionidae; 17:葬甲科 Silphidae; 18:冬大蚊科 Trichoceridae; 19:毛蚊科 Bibionidae; 20:蚤蝇科 Phoridae; 21:大蚊科 Tipulidae; 22:舞虻科; Empidadae; 23:鹬虻科 Rhagionidae; 24:长足虻科 Dolichopodadae; 25:剑虻科 Therevidae; 26:食木虻科 Xylophagiae; 27:蚁科 Formicidae; 28:土蝽科 Cydnidae; 29:椿象若虫科 Hemiptera; 30:蝙蝠蛾科 Hepialidae; 31:尺蛾科 Geometridae; 32:天蛾科 Sphingidae; 33:球螋科 Forficulidae; 34:蝼蛄科 Gryllotalpidae; 35: 蜢总科 Eumastacoidea

更好的对大环境变化及发展趋势进行评价和预测。

4.2 不同纬度大型土壤动物空间分布特征

不同样地微生境的变化也会引起土壤动物群落结构的细微差异,土壤环境因子是引起土壤动物个体密度和丰富度变化的主要原因[31]。个体密度和丰富度随着纬度的升高呈先上涨后下降趋势。由于塔河的年平均气温低,降水量少,纬度高,所以大型土壤动物的个体密度和丰富度均最少,而带岭大型土壤动物的个体密度和丰富度高于帽儿山的原因有以下两点:(1)带岭的土壤有机质、速效钾、速效磷、全磷等土壤环境因子均高于帽儿山,且带岭的优势度指数也高于帽儿山,综合各因素或者某些因子对其影响导致带岭的大型土壤动物个体密度和丰富度高于帽儿山。(2)本研究于 8 月在野外取样,带岭的降水集中在 6—8 月,土壤动物较多;帽儿山在采样期间受环境胁迫影响较大,如施肥量及时间的不同等原因导致帽儿山的土壤动物个体密度和丰富度减少[32-33]。不同纬度大型土壤动物丰富度、个体密度差异不显著,主要是因为土壤动物优势类群和常见类群多具有较强的环境适应性(图 3),由此使不同纬度农田耕地生态系统大型土壤动物群落存在较大的稳定性,群落结构不随纬度和环境差异而显著变化。

凋落物及其形成的腐殖质是土壤动物重要食物来源,且具有一定保温和保湿作用,有利于土壤动物群落的数量增长,随深度增加,土壤有机质养分下降(表 1),且通气透水性及温度随之降低,因此,在垂直方向上,不同纬度的大型土壤动物个体密度及丰富度有明显表聚性特征。此次调查研究结果表明,不同层次大型土壤动物的个体密度和丰富度下降幅度有所差异,导致不同纬度样地大型土壤动物在土壤剖面中的分布模式存在差异。其中,除 5—10cm 土层的帽儿山样地的丰富度外,3 个不同纬度样地的个体密度和丰富度均随土层深度的增加而下降,且中、低纬度样地表现为中层和下层土壤相近,从中层开始明显下降,高纬度样地则表现为

表层土壤和中层土壤相近,下层土壤明显较低。类群和个体最小密度为高纬度的最深层,类群和个体最大密度为带岭样地的表层[10]。而帽儿山 5—10cm 土层的丰富度最大,可能由于 8 月降水丰富,土壤表层受雨水的冲刷导致土壤动物种类减少,且 5—10cm 的 H'指数、E 指数和 D 指数均高于 0—5cm 层,土壤动物多样性反映土壤中食物资源和生境的多样性,多样性指数比类群和密度更能体现群落的结构,在理论和实践中都具有重要意义,所以在帽儿山大型土壤动物丰富度 5—10cm 土层最丰富,土壤动物垂直分布特征说明,维持土壤表层的质量在保护土壤动物种群方面具有重要意义[34]。

4.3 不同纬度大型土壤动物与土壤理化性质相关分析

3 个不同纬度样地土壤动物的个体密度和丰富度的多少受土壤环境因子的影响,通过双变量相关分析结果表明:速效钾和有机质含量多少对塔河、带岭和帽儿山样地的土壤动物的个体密度有重要的影响,同时,全磷、速效磷、全氮和含水量的变化对各纬度样地的个体密度和丰富度多少也起到决定性的作用。

塔河样地的丰富度与土壤环境因子呈正相关;个体密度除与速效磷和全氮呈负相关外与其他土壤环境因子呈正相关。带岭样地的丰富度与速效钾、速效磷、有机质呈负相关,与全氮、全磷和 pH 值呈正相关;个体密度与 pH 值呈正相关,与其他土壤环境因子呈负相关。帽儿山样地的丰富度与速效钾呈正相关、个体密度与速效钾呈负相关,而丰富度和个体密度与全氮相关结果与上相反。但是,3 个不同纬度样地大型土壤动物的个体与土壤环境因子均无显著的相关性,这与刘继亮等[35]在左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究中的结果不同。CCA 结果表明,不同纬度不同类群土壤动物与土壤理化环境的相关性不同:塔河样地的舞虻科(Empididae)和带岭样地的毛蚊科(Bibionidae)与全氮相关性较大,带岭样地的蜘蛛目(Araneida)和叩甲科(Elateridae)、帽儿山样地的尺蛾科(Geometridae)与土壤有机质相关性较大。不同纬度不同类群的土壤动物具有选择性吸收和富集某些元素的功能,因此研究不同纬度土壤动物分布与生态环境的关系,对促进土壤动物的有益发展和抑制其有害活动,维持土壤生态系统平衡,具有重要意义。

5 结论

通过对 3 块不同纬度玉米农田样地的大型土壤动物研究可知,不同纬度大型土壤动物的个体密度、丰富度和多样性指数的垂直分布基本呈现表聚性,及随土层深度的增加而呈递减变化;大型土壤动物的个体密度和丰富度未随纬度的升高而呈现规律性的变化趋势;大型土壤动物的群落结构和多样性受纬度和土壤理化性质的影响,在局地尺度环境因子对土壤动物的影响不容忽视,但不同样地间的大型土壤动物的群落结构指标均无显著性差异,说明多数类群在黑龙江省不同纬度的大环境中具有一定的适应性。

致谢:感谢塔河、带岭、帽儿山当地农民在实验过程中给予的帮助。

参考文献(References):

[1] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
[2] 朱永恒, 赵春雨, 王宗英, 濮励杰. 我国土壤动物群落生态学研究综述. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1477-1481.
[3] 高立杰, 侯建华, 安哲, 高宝嘉. 内蒙古高原东南缘森林草原交错带土壤动物群落特征. 草业学报, 2013, 22(4): 27-34.
[4] 潘林, 王文峰, 郭继勋, 孙玉坤. 扎龙自然保护区大型土壤动物的群落结构. 土壤通报, 2012, 43(4): 781-786.
[5] 林恭华, 赵芳, 陈桂琛, 陈生云, 苏建平, 张同作. 青海湖北岸不同土地利用方式对大型土壤动物群落的影响. 草业学报, 2012, 21(2): 180-186.
[6] 林英华, 孙家宝, 张夫道. 我国重要森林群落凋落物层土壤动物群落生态特征. 生态学报, 2009, 29(6): 2938-2944.
[7] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. Oikos, 2004, 104(2): 230-246.
[8] Begon M, Harper J L, Townsend C R. Ecology: individuals, populations and communities. Sunderland, Massachusettes: Sinauer Associates, Inc., 1986: 386-415.
[9] Zhao H L, Li J, Liu R T, Zhou R L, Qu H, Pan C C. Effects of desertification on temporal and spatial distribution of soil macro-arthropods in Horqin sandy grassland, Inner Mongolia. Geoderma, 2014, 223-225: 62-67.

[10] 赵哈林, 刘任涛, 赵学勇, 张铜会. 沙漠化对科尔沁沙质草地大型土壤节肢动物群落时空变化的影响. 草地学报, 2013, 21(2): 394-400, 405-405.

[11] 刘任涛. 科尔沁沙地土壤动物群落分布特征. 北京: 科学出版社, 2015.

[12] 赵哈林, 刘任涛, 周瑞莲, 曲浩, 潘成臣, 王燕, 李瑾. 沙漠化对科尔沁沙质草地大型土壤动物群落的影响及其成因分析. 草业学报, 2013, 22(3): 70-77.

[13] 刘任涛, 赵哈林. 沙质草地土壤动物的研究进展及建议. 中国沙漠, 2009, 29(4): 656-662.

[14] 宋理洪, 武海涛, 吴东辉. 我国农田生态系统土壤动物生态学研究进展. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2898-2906.

[15] Rivadeneira M M, Fernández M, Navarrete S A. Latitudinal trends of species diversity in rocky intertidal herbivore assemblages: spatial scale and the relationship between local and regional species richness. Marine Ecology Progress Series, 2002, 245: 123-131.

[16] Qiao X J, Jabot F, Tang Z Y, Jiang M X, Fang J Y. A latitudinal gradient in tree community assembly processes evidenced in Chinese forests. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24(3): 314-323.

[17] Gorelick R. Species richness and the analytic geometry of latitudinal and altitudinal gradients. Acta Biotheoretica, 2008, 56(3): 197-203.

[18] Fiera C, Ulrich W. Spatial patterns in the distribution of European springtails (Hexapoda: Collembola). Biological Journal of the Linnean Society, 2012, 105(3): 498-506.

[19] 张雪萍, 黄初龙, 李景科. 赤子爱胜蚓对森林凋落物的分解效率. 生态学报, 2005, 25(9): 2427-2433.

[20] 张雪萍, 黄丽荣, 姜丽秋. 大兴安岭北部森林生态系统大型土壤动物群落特征. 地理研究, 2008, 27(3): 509-518.

[21] 仲伟彦, 殷秀琴, 陈鹏. 帽儿山森林落叶分解消耗与土壤动物关系的研究. 应用生态学报, 1999, 10(4): 511-512.

[22] 林英华, 孙家宝, 刘海良, 张夫道, 孙龙, 金森. 黑龙江帽儿山土壤动物群落组成与多样性分析. 林业科学, 2006, 42(4): 71-77.

[23] 张雪萍, 张毅, 侯威岭, 殷秀琴. 小兴安岭针叶凋落物的分解与土壤动物的作用. 地理科学, 2000, 20(6): 552-556.

[24] 李娜, 张雪萍, 张利敏. 红松人工林与天然次生林大型土壤动物功能类群. 应用与环境生物学报, 2014, 20(1): 22-29.

[25] 黄丽荣, 张雪萍. 大兴安岭北部森林生态系统土壤动物的功能类群及其生态分布. 土壤通报, 2008, 39(5): 1017-1022.

[26] 张志罡, 孙继英, 胡波, 颜亨梅. 土壤动物研究综述. 生命科学研究, 2006, 10(4): 72-75.

[27] 刘继亮, 曹靖, 张晓阳, 李世杰, 潘春林. 秦岭西部日本落叶松林大型土壤动物群落特征. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 611-617.

[28] 吴东辉, 张柏, 陈鹏. 长春市不同土地利用条件下大型土壤动物群落结构与组成. 动物学报, 2006, 52(2): 279-287.

[29] 董炜华, 王子婷, 李锋瑞, 刘继亮. 黑河中游绿洲化过程中不同开垦年限农田大型土壤动物群落特征. 地理科学, 2014, 34(10): 1254-1261.

[30] 张淑花. 农田生态系统土壤动物群落结构对不同管理与利用方式的响应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2014: 19-22.

[31] 傅必谦, 陈卫, 董晓晖, 邢忠民, 高武. 北京松山四种大型土壤动物群落组成和结构. 生态学报, 2002, 22(2): 215-223.

[32] 朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响. 中国农业科学, 2015, 48(5): 911-920.

[33] 林英华, 朱平, 张夫道, 彭畅, 高洪军, 刘淑环. 吉林黑土区不同施肥处理对农田土壤昆虫的影响. 生态学报, 2006, 26(4), 1122-1130.

[34] 李娜, 张雪萍, 张利敏. 三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态. 生态学报, 2013, 33(19): 6236-6245.

[35] 刘继亮, 殷秀琴, 邱丽丽. 左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 130-136.